

마산 연안의 침수 수치모형 실험**Inundation Numerical Simulation in Masan Coastal Area**

김 차 검* / 이 종 태** / 장 호 식***

Kim, Cha-Kyum / Lee, Jong Tae / Jang, Ho Sik

Abstract

Typhoon Maemi landed on the southern coast of Korean Peninsula at 21:00, September 12, 2003 with a central pressure of 950 hPa. A three dimensional (3D) inundation model was established to calculate the storm surge and flooded area due to Typhoon Maemi. A field survey of storm surge traces in Masan City was carried out to evaluate the inundation water depth. Hydromet-Rankin Vortex model was used to calculate the atmospheric pressure and the surface wind fields. The inundation area, storm surge and typhoon-induced current were calculated using the 3D model. The peak of computed storm surge in Masan Port using the 3D model was 238 cm, and the observed peak was 230 cm. The simulated storm surge and the inundation area showed good agreement with field survey data. The comparison of the 3D and the two dimensional (2D) models of storm surge was carried out, and the 3D model was more accurate. The computed typhoon-induced currents in the surface layer of Masan Bay went into the inner bay with 30~60 cm/s, while the currents in the bottom layer flowed out with 20~40 cm/s.

Keywords : inundation model, storm surge, Typhoon Maemi, Masan coastal area

요 지

태풍 “매미”는 2003년 9월 12일 오후 9시에 중심기압 950 hPa을 가지고 경남 남해안에 상륙하였다. 본 연구에서는 태풍 매미로 인한 마산 연안의 침수와 태풍해일을 해석하기 위해 3차원 침수모형을 구축하였으며, 침수지역을 현장 조사하였다. Hydromet-Rankin Vortex 모형을 이용하여 바람장 및 기압장을 해석하였으며, 3차원 침수모형을 이용하여 마산 연안 침수지역, storm surge 및 태풍류를 수치계산하였다. 침수지역과 storm surge에 대한 수치모형의 계산결과는 현장 조사결과와 거의 일치하였다. 마산항에서 3차원 모형에 의한 storm surge의 최고 수위는 238 cm, 현장관측치는 230 cm로 비교적 정확하게 평가하였다. 3차원 모형과 2차원 모형 결과를 비교하였는데 3차원 모형이 2차원 모형보다 storm surge를 보다 정확하게 해석하였다. 마산만에서 태풍해일에 의해 발생한 태풍류는 표층에서는 30~60 cm/s 크기로 만내로 유입하나, 저층에서는 20~40 cm/s 크기로 만외로 유출하는 흐름이 탁월하였다.

핵심용어 : 침수모형, 태풍해일, 태풍 매미, 마산연안

* 교신저자, 경남도립남해대학 조선토목계열 교수 (e-mail: kick@namhae.ac.kr)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Naval Architecture and Civil Eng., Gyeongnam Provincial Namhae College, Gyeongnam 668-801, Korea

** 경기대학교 토목환경공학부 교수 (e-mail: jtlee@kyonggi.ac.kr)

Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Kyonggi Univ., Seoul 120-702, Korea

*** 경남도립남해대학 조선토목계열 조빙교수 (e-mail: gpsjhs@namhae.ac.kr)

Temporary Professor, Dept. of Naval Architecture and Civil Eng., Gyeongnam Provincial Namhae College, Gyeongnam, Korea

1. 서 론

부산, 마산, 남해, 여수 등 남해안은 태풍 통과시마다 폭풍해일로 인한 막대한 재산피해를 입고 있음에도 불구하고 해안도시 침수예보에 대한 충분한 연구 및 방재 대책이 부족한 실정에 있다. 특히, 마산, 부산지역은 태풍 내습시마다 해안침수 사례가 발생하고 있지만, 이에 대한 방재대책은 일시적인 것으로 미흡한 실정이다. 중앙재해대책본부에 따르면, 2003년 태풍 “매미”로 인한 인명피해 132명(사망 119명, 실종 13명), 재산피해는 약 5조원인 것으로 조사되었다. 따라서 연안 해일의 피해가 예상되는 지역을 중심으로 해일 내습시 피해저감을 위한 대책 수립이나, 예경보 시스템을 구축하는 것이 필요하다. 연안도시 침수 예경보 시스템을 구축하기 위해서는 태풍 해일 예측 및 해안침수모형 구축에 대한 연구가 우선적으로 수반되어야 한다. 본 연구에서는 연안도시 침수 예경보 시스템 구축 일환으로 2003년 태풍 “매미” 통과 기간 중에 있어서 마산 연안의 침수지역을 해석하고자 한다.

Storm surge에 대해서는 국내외적으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 국내에서 storm surge에 대한 2차원 수치모형 해석으로는 이종섭 등 (1990), Oh and Kim (1990), 강시환 등 (2004), Choi et al. (2004), Lee et al. (2007), 강주환 등 (2008)의 연구가 있으며, 3차원 모형에 대한 storm surge 연구는 김차겸과 이종태 (2005) 등의 연구가 있다. Storm surge에 대한 국외연구로는 Holland (1980), Watanabe and Shibaki (2002), Kawai et al. (2005), Wang et al. (2005), Yeh et al. (2005) 등의 연구가 있다. Watanabe and Shibaki (2002)은 파랑의 setup과 밀도효과를 고려한 multi-level을 이용하여 태풍해일 해석 모형을 개발하였다. Wang et al. (2005)은 황해와 발해 연안에서 수치모형과 극지해석 기법을 이용하여 재현주기별 storm surge의 최대 상승량을 계산하였다. Yeh et al. (2005)은 Taiwan 해역을 대상으로 파랑-조석-해일을 결합한 모형을 이용하여 연안재해 경고시스템구축에 대한 연구를 하였다.

침수모형에 대해서는 문승록 등 (2006)이 2차원 모형인 MIKE 21 모형을 이용하여 목포 연안해역에 대해 태풍해일로 인한 범람모의를 수행하였으며, Yasuda et al. (2005)은 2차원 모형인 MARS (Kunugi, 1997) 모형을 이용하여 마산만의 해일범람을 모의하였다. 이와 같이 태풍해일로 인한 침수모형에 대한 연구는 대부분 2차원 모형으로 수행되었으나, 태풍해일로 인한 흐름과 해일고 등을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 3차원 모형을 사용해야 한다. 현재, 국외에서는 해안도시 침수 모형, 도피 모형 개발 및 종합적 태풍해일 방재시스템 구축에 많은 투자와 연구를 하고 있으나, 우리나라는 아직 이에 대한 연구와

투자가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 김차겸과 이종태 (2005), Kim and Lee (2007)에 의해 개발된 3차원 태풍해일 모형을 해안 침수해석에 적용하여 마산연안의 3차원 침수모형을 구축하고자 한다. 국내에서 사용되고 있는 태풍해일이나 침수해석 모형은 거의 모두 외국에서 개발되었거나 또는 개발된 것을 수정하여 사용하고 있으나, 본 연구에서 사용하는 모형은 국내에서 개발된 모형이라는 데 큰 의미가 있을 수 있다. 또한, 해안도시 침수모형 구축을 통해 마산 해안도시 침수도 작성 및 태풍 시 침수지역을 예측하여 태풍해일시 해안도시침수로 인한 재난 피해를 최소화하는데 기여하고자 한다.

2. 수치계산모형

2003년 태풍 “매미”로 인한 마산연안의 태풍해일 및 침수지역을 해석하기 위해 국립해양조사원이 마산항에서 관측한 수위관측결과 분석, 마산시 방문 침수지역 조사, 3차원 태풍해일로 인한 침수예측 모형을 구축하였다.

2.1 수치지도를 이용한 침수모형 격자망 구축

해안도시 3차원 침수모형을 구축하기 위해서는 우선 수치 육도와 해도를 이용한 육상부 표고, 해상부 수심을 작성하여 수치모형의 격자시스템으로 변환시켜야 한다. 2003년 태풍 “매미”로 인한 마산연안의 태풍해일 및 침수지역을 해석하기 위해 1/1,000 및 1/5,000 수치육도를 사용하여 침수 모형의 수치격자망을 구성하였다. 해도는 국립해양조사원에서 제공하는 한국전자해도를 이용하였다. 격자간격은 마산연안의 협역모형에서 30 m로 하였다.

2.2 현장관측 및 조사 자료 분석

마산만의 태풍해일고를 해석하기 위해 국립해양조사원이 마산항에서 관측한 조위, 태풍 “매미” 통과 시 수위관측자료, 마산 및 부산 지방 기상관측소의 기압분포, 바람 자료를 수집 분석하였다. Storm surge는 국립해양조사원이 마산항에서 관측한 결과를 분석하여 모형결과와 비교 분석하였다. 해안침수해석에 관해서는 현장답사 및 기존자료에 의해 취득한 해안침수 현황도를 작성하여 수치모형에 의한 해안도시 침수분포도와 비교 검토하였다.

2.3 3차원 침수 모형

2.3.1 기초방정식

Semi-implicit법을 이용한 3차원 태풍해일 모형을 개발하여 울산연안과 완도연안을 포함하는 남해안 광역에

적용하여 남해안의 storm surge, 마산연안의 침수지역 등을 해석하고자 한다.

정수압분포와 Boussinesq 근사를 가정하면, z 축을 연직 방향으로 하는 3차원 (x, y, z) 좌표 상에서 비압축성 유체에 대한 기초방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ & = fv - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ & - fu - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (4)$$

여기서, x, y =수평방향의 공간좌표, z =연직방향의 공간좌표, u, v, w 각각 x, y, z 방향의 유속, p =압력, ρ_o =기준밀도, f =Coriolis 계수, t =시간, g =중력가속도, ρ =밀도, $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ =각각 x, y, z 방향의 와동점성계수, h =수심이다.

Eqs. (1)~(3)을 층별로 적분하여 나타내면 Eqs. (5)~(7)과 같이 된다.

- 해수면 변위 계산을 위한 연속방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_{k=1}^b \left\{ \frac{\partial (uh)_k}{\partial x} + \frac{\partial (vh)_k}{\partial y} \right\} = 0, \quad (5)$$

$k = 1, 2, \dots, b$

- k 층에 대해 적분된 x, y 방향 운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w}{h} (u_{k-1/2} - u_{k+1/2}) \\ & = fv - g \left\{ \frac{\rho_{k-1}}{\rho_k} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\rho_k - \rho_{k-1}}{\rho_k} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{h} \left\{ \left(\epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{k-1/2} - \left(\epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{k+1/2} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{h} (v_{k-1/2} - v_{k+1/2}) = \\ & - fu - g \left\{ \frac{\rho_{k-1}}{\rho_k} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\rho_k - \rho_{k-1}}{\rho_k} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{h} \left\{ \left(\epsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{k-1/2} - \left(\epsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{k+1/2} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, ζ 는 해수면의 진폭이고, h 는 저면을 나타낸다.

Eqs. (6) and (7)의 우변 η 는 내부 경계면의 수위로써 layer 모형의 장점을 도입한 항이며, 연직유속 w 를 포함하는 좌변 네번째 항은 level 모형의 장점을 도입한 항이다. - 내부경계면 수위는 다음 식에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \eta_k}{\partial t} + \frac{\partial (uh)_k}{\partial x} + \frac{\partial (vh)_k}{\partial y} + Q = 0, \\ & k = 1, 2, \dots, b \end{aligned} \quad (8)$$

Eq. (8)에서 Q 는 단위시간, 단위면적당 하층에서 상층으로 해수의 연행량이다.

- 연직속도 성분은 다음 식에 의해 계산된다.

$$w_{k+1/2} = \sum_{l=k}^b \left\{ \frac{\partial (uh)_l}{\partial x} + \frac{\partial (vh)_l}{\partial y} \right\} = 0 \quad (9)$$

2.3.2 수치해석 방법 및 조건

본 연구에서는 Eqs. (5)~(9)를 유한차분화하여 삼중대각행렬을 구성하여 ADI (Alternating Direction Implicit) 방법으로 계산하였으며, 공간적으로는 staggered grid scheme을 사용하였다. 수평와동점성계수 $\epsilon_x = \epsilon_y = 0.03 \Delta \ell^{4/3} = 2.8 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 하였으며, 여기서 $\Delta \ell$ 은 격자간격이다. 연직와동점성계수는 각 층간의 유속차로부터 구한다. 해안도시 침수 모형에서 마산 연안도시를 대상으로 한 협역모형의 격자간격은 30 m, 총 격자수는 $200 \times 280 = 56,000$ 격자체계로 구성하였다. 침수 모형에 사용된 태풍은 2003년 태풍 "매미"를 대상으로 하였으며, 해면에서 바람 조건은 태풍 시 해상풍 모형 결과를 입력자료로 사용하였다.

2.4 태풍 시 해상풍 모형

2.4.1 기초방정식 및 해석방법

태풍은 그 중심부근에서 시간적·공간적 변화가 커서 일반 기상분석에 의한 예측이 어렵기 때문에 중심기압, 최대풍반경, 이동속도 등의 요소들을 파라메터화하여 바

람장을 산출하는 태풍모형을 이용하게 된다.

태풍 “매미”에 대한 해상풍은 Hydromet-Rankin Vortex model (Holland, 1980; Bretschneider et al., 1984)을 사용하여 계산하였다. 이 모형에 기초하면, 태풍의 압력분포는 다음과 같이 된다.

$$\frac{P(r) - P_o}{P_\infty - P_o} = e^{-R/r} \quad (10)$$

여기서, P_o =태풍의 중심기압, $P(r)$ =반경 r 에서 기압, P_∞ =무한거리 ($r=\infty$)에서 기압 (=1,010 hPa), R =태풍중심에서 최대풍속지점까지의 반경, r =태풍중심에서 임의지점까지의 거리이다.

지균풍속은 다음과 같은 경도풍의 방정식으로부터 구한다.

$$\frac{V_g^2}{r} + fV_g = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (11)$$

$$V_g = -\frac{fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}} \quad (12)$$

여기서, V_g =태풍의 중심으로부터 반경 r 거리에서 지균풍속, f =Coriolis parameter (=2 ω sin ϕ), ω =지구자전 각속도 (=7.272 $\times 10^{-5}$ rad/s), ϕ =위도, ρ =공기밀도 (1.2 $\times 10^{-3}$ g/cm³)이다.

해수면 10m 상에서 해상풍속은 다음 식으로부터 구했다.

$$\vec{U} = C_g \vec{V}_g + C_b \vec{V}_b \quad (13)$$

여기서 V_b =태풍의 전진속도이며,

$$C_g = 0.424 + 0.01007\phi - 9.28571 \times 10^{-5}\phi^2 \quad (14)$$

$$C_b = \frac{Rr}{R^2 + r^2} \quad (15)$$

본 연구에서는 기상청 기압분포도를 사용하여 해상풍을 계산하였다. 격자간격은 x, y 방향 동일하게 500m로 하였다. 계산영역은 울산 해역에서 완도해역까지 동서방향으로 290 km, 남북방향으로 195 km인 580 \times 380 격자체계로 구성하였으며, 총 격자수는 220,400개이다.

3. 태풍 “매미”의 이동경로 및 수치 격자망 구축

3.1 태풍 “매미” 발생 및 이동 경로

제14호 태풍 “매미”는 2003년 9월 6일 15시경 괌섬 북서쪽 약 400 km 부근 해상 (16.0N, 141.5E)에서 발생하여 느리게 북서진 후, 9일 09시경에 태풍 (TY)으로 발달한 후 11일 09시경에 중심기압이 910 hPa로 가장 낮았다. 이 태풍은 11일 09시부터 전향하기 시작하여 12일 06시경부터 북북동진하면서 빠른 속도로 진행하였고, 12일 18시경 제주도 성산포 동쪽 부근해상을 거쳐 12일 20시경에 경상남도 사천시 부근 해안으로 상륙하였다. 육상에 상륙한 태풍은 북북동진하여 경남 함안을 거쳐 13일 02시 30분경에 울진 부근 해안을 통해 동해상으로 진출하였으며, 태풍의 이동경로는 Fig. 1과 같다.

3.2 침수모형 수치격자망 구축

마산시 수치육도 (1/1,000 및 1/5,000)와 마산만 수치 해

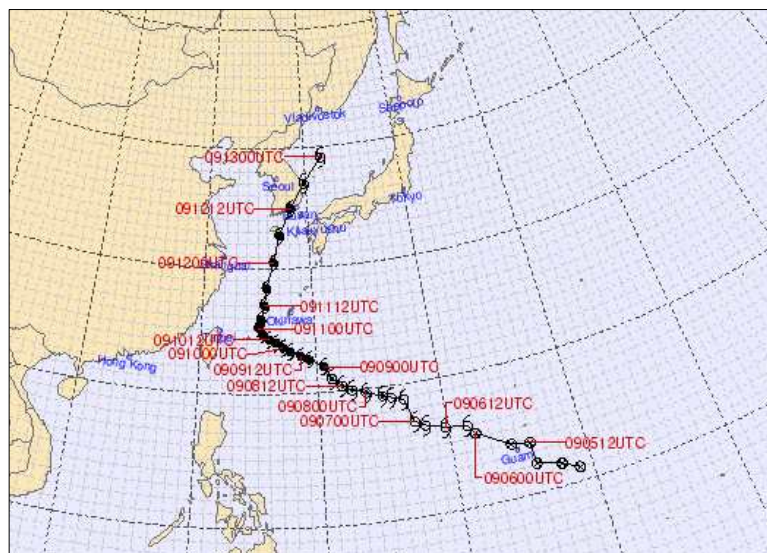


Fig. 1. Track of Typhoon Maemi

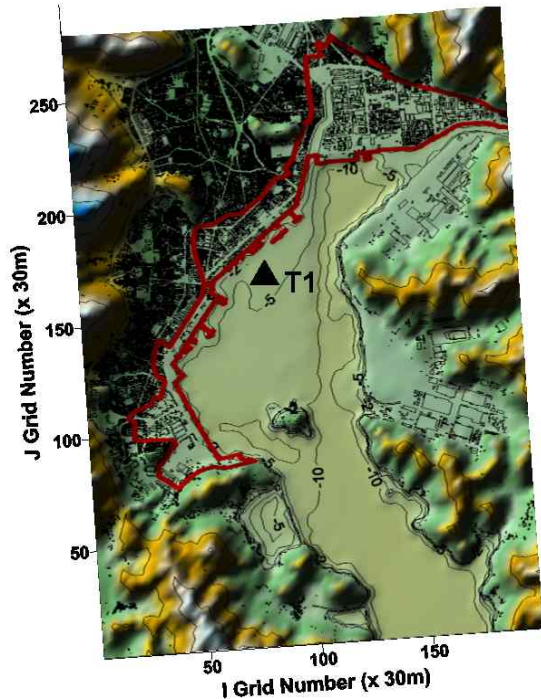


Fig. 2. Topography and Numerical Grid System of Masan Coastal Area

도를 중첩시켜 Fig. 2와 같이 마산 연안의 수치모형을 위한 상세 격자(격자간격=30m) 시스템을 구성하였다.

마산만 수치육도를 구축할 때 1/1,000도에서는 도심부의 표고자료를 참조하였고, 1/5,000도에서는 등고선자료를 이용하여 격자간격 30m로 구축하였다. 마산만 수치해도는 국립해양조사원에서 제공하는 한국전자해도를 이용하여 구축하였다.

4. 연구결과

4.1 태풍 “매미” 통과 시 기상 관측결과

태풍 “매미” 통과 기간인 2003년 9월 11~13일 마산 및 부산 기상관측소에서 관측한 풍속과 기압의 시간적 변화 분포를 각각 Figs. 3 and 4에 나타냈다. Fig. 3은 시간대별 풍속을 나타내며, 실선은 마산, 점선은 부산에서 관측된 풍속을 나타낸다. 마산에서 최대 풍속은 9월 12일 22시 34.6m/s, 부산에서 최대 풍속은 9월 12일 21시 45.2m/s이다. Fig. 4는 마산과 부산에서 관측된 기압분포를 나타내며, 실선은 마산, 점선은 부산지방이다. 마산에서 최저 기압은 9월 12일 21시에 969 hPa, 부산에서 최저기압은 9월 12일 21시에 981 hPa로 관측되었다. 즉, 태풍 “매미” 통과 시 풍속은 부산이 마산보다 크고, 기압은 부산이 마산보다 작게 나타났다.

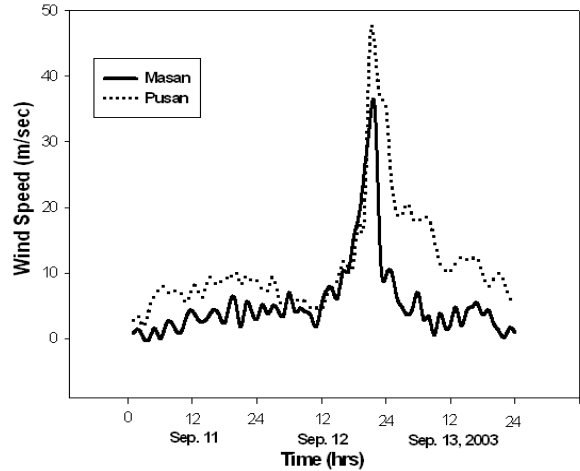


Fig. 3. Time Series of Wind Speed

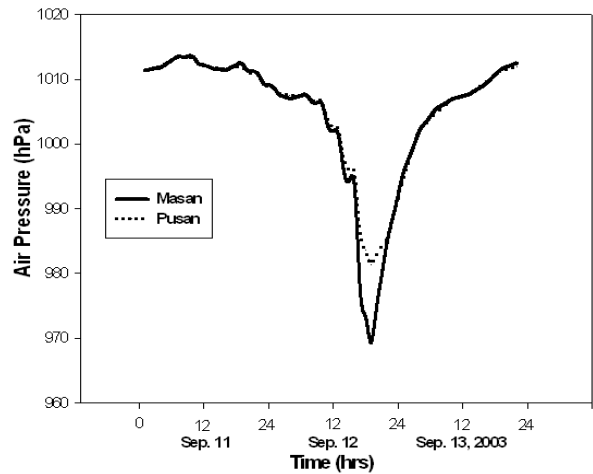


Fig. 4. Time Series of Air Pressure

4.2 태풍고조 관측 결과

2003년 태풍 “매미” 통과 시 국립해양조사원이 마산항에서 관측한 수위로부터 조위를 제거한 태풍 “매미”로 인한 고조(storm surge) 분석결과를 Fig. 5에 나타냈다. 마산항에서 관측된 storm surge는 230 cm로 나타났다.

마산만을 접하고 있는 마산시 연안의 지표고는 MSL (Mean Sea Level)로부터 대략 190~220 cm으로 대단히 낮으며, 또한 우수관 상단은 지면으로부터 아래로 70~120 cm에 위치해 있다(한국수자원학회, 2003). 마산만의 약 최고고조면의 높이는 215~220 cm이기 때문에 우수관 상단고가 약 110 cm 이하이면 대조기 만조 시에 우수관이 해수에 잠기게 된다. 따라서 태풍 “매미” 통과 시 태풍해일로 인한 수위가 230 cm 정도 상승하게 되었으며, 이로 인해 마산연안은 약 110~160 cm 정도는 침수하게 된 것으로 추정된다.

4.3 기압장 분포 및 해상풍 계산결과

Fig. 6은 마산 지방에 피해를 가장 많이 입힌 시간인 2003년 9월 12일 22시 기압분포도를 나타낸다. 이때 마산 지역에서 기압분포는 965~975 hPa인 것으로 나타났다.

Fig. 7은 2003년 9월 12일 22시 해상풍속의 벡터도를 나타내고, Fig. 8은 2003년 9월 12일 22시 해상풍속의 등속도선을 나타낸다. 마산 지방에 가장 피해를 많이 입힌 시간대인 9월 12일 22시 최대풍속은 32~36 m/s로 나타났

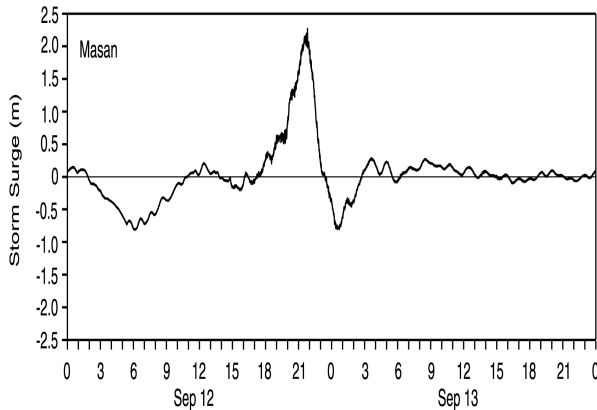


Fig. 5. Time Series of Storm Surge in Masan Port

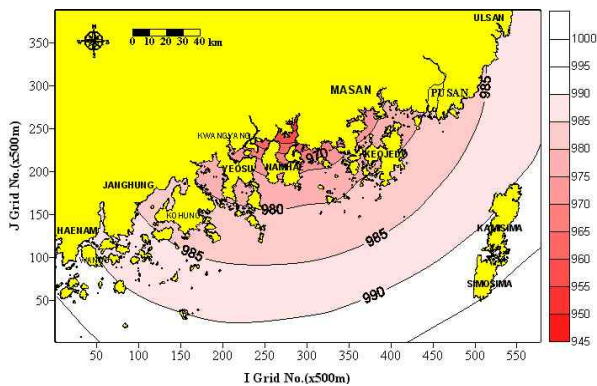


Fig. 6. Air Pressure Field at 22:00 on Sep. 12, 2003

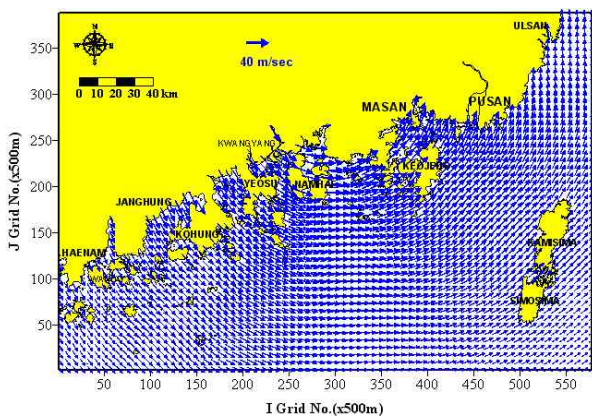


Fig. 7. Computed Wind Velocity at 22:00 on Sep. 12, 2003

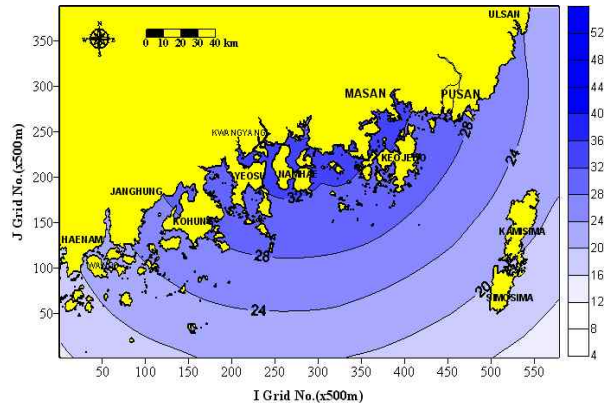


Fig. 8. Computed Wind Speed Contour at 22:00 on Sep. 12, 2003

으며, 남해, 마산 지방을 중심으로 강한 반시계방향으로의 회전류가 발생하고 있다. Fig. 7의 풍속 벡터를 보면, 태풍 통과시나 통과 후에 태풍의 이동경로를 중심으로 했을 경우 북서쪽~남쪽 해역에서 큰 피해를 입을 수 있다는 것을 알 수 있다. 일례로 2003년 태풍 “매미” 통과 시 남해군의 서쪽과 남쪽해역에서 유례를 찾아볼 수 없는 태풍 피해를 입었는데 (한국수자원학회, 2003), 이것은 태풍 “매미”가 남해군을 통과함으로 인해 북서풍계~남풍계의 바람에 의해 서쪽~남쪽 연안에 걸쳐 많은 피해가 발생한 것으로 사료된다.

4.4 침수모형 계산 결과

4.4.1 마산연안에서 태풍류 계산 결과

Fig. 9는 2003년 9월 12일 22시 태풍 “매미” 통과시 표층과 저층에서 계산한 태풍류의 패턴을 나타낸다. Fig. 9 (a)는 표층에서 계산된 결과이고, Fig. 9 (b)는 저층에서 계산된 결과이다. 마산만에서 태풍 “매미”로 인해 발생한 표층의 최대유속은 약 30~60 cm/s 크기로 발생하여 마산만으로 유입하고, 저층에서 최대유속은 약 20~40 cm/s로 표층과 반대방향의 흐름인 마산만에서 외해로 유출하는 흐름패턴을 보여주고 있다. 표층과 저층에서 계산된 태풍류의 계산결과는 전형적인 태풍해일로 인한 3차원 흐름구조를 잘 나타내고 있는 것으로 사료된다.

4.4.2 태풍해일 계산 결과

Fig. 10은 태풍 “매미” 통과 시 마산항 (Fig. 2의 정점 T1)에서 storm surge의 관측결과와 3차원 수치모형의 계산결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 계산된 결과이고 점선은 관측치이다. 태풍 “매미”에 의한 storm surge는 마산항에서 230 cm 관측되었으며, 3차원 모형에 의한 storm surge의 최고 수위는 238 cm로 나타

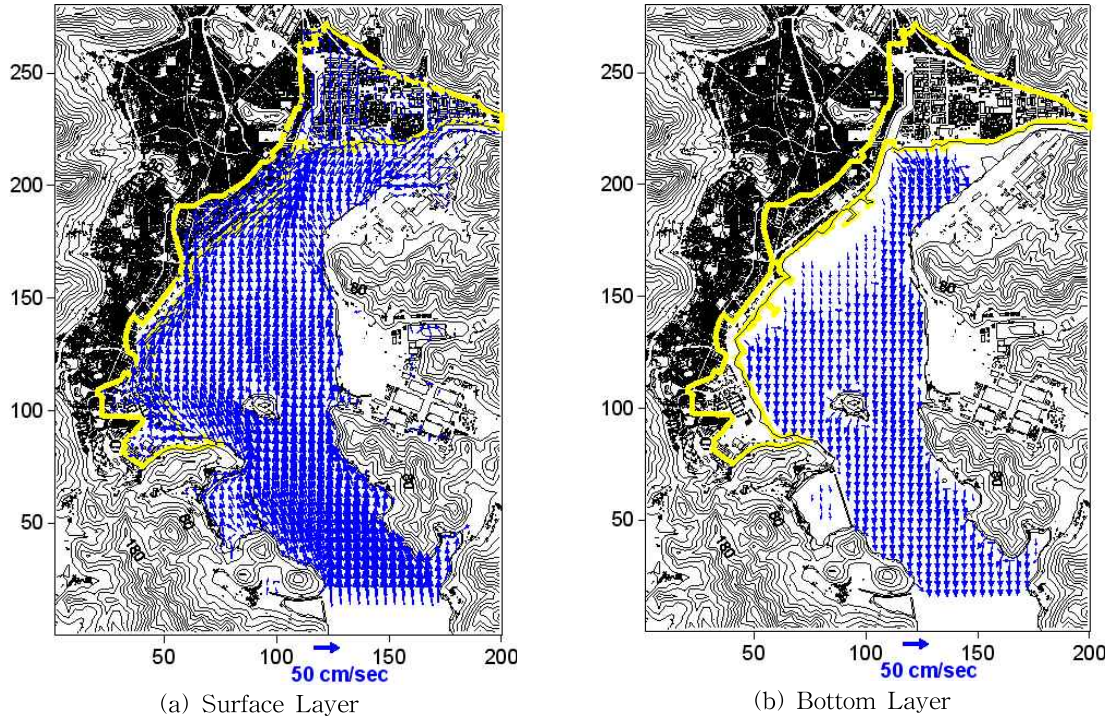


Fig. 9. Computed Typhoon-Induced Current in Masan Bay at 22:00 on Sep. 12, 2003

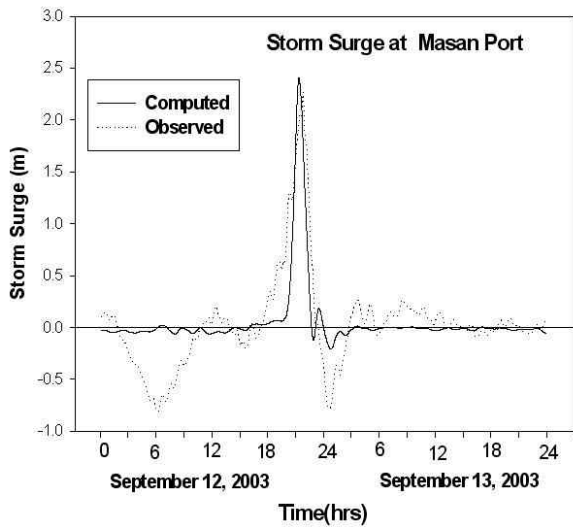


Fig. 10. Comparison of Computed and Observed Storm Surges in Masan Port

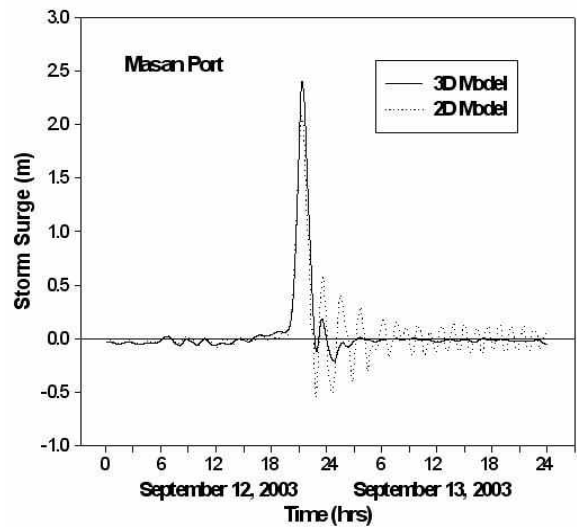
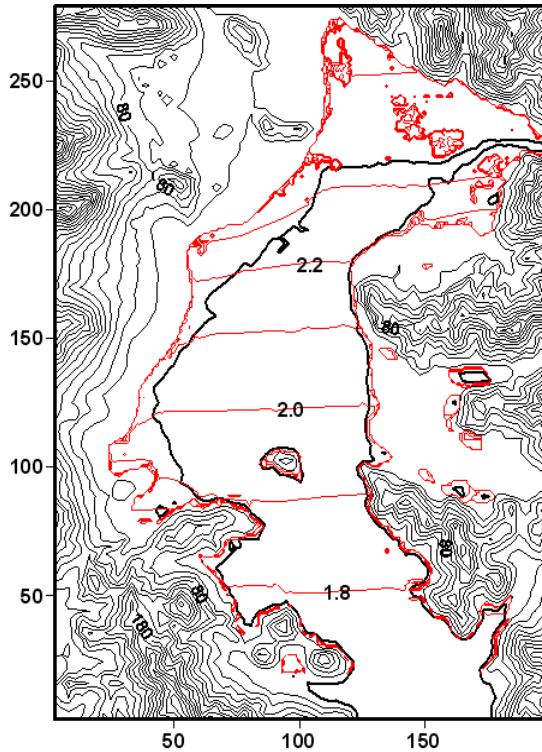


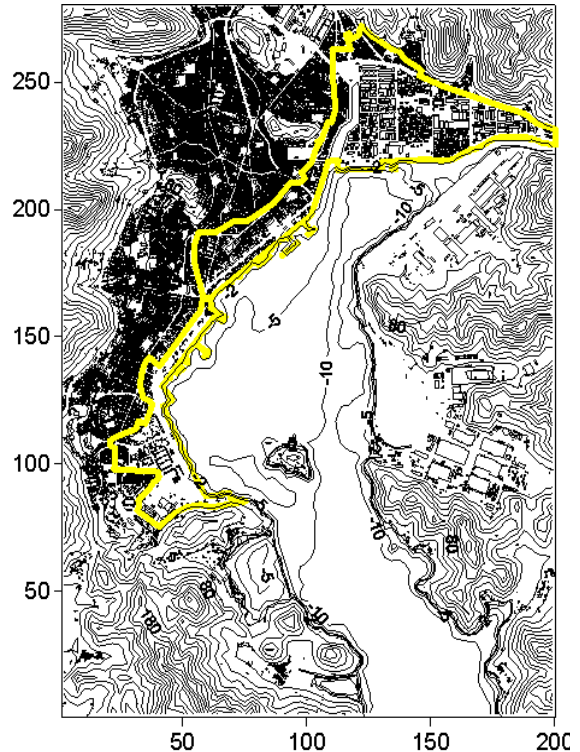
Fig. 11. Comparison of Three Dimensional and Two Dimensional Model Results

났다. 즉, 3차원 모형에 의해서 계산한 storm surge는 현장관측결과와 8cm 정도의 오차를 가지고 있다. 3차원 태풍해일 모형은 peak 상태에서는 storm surge를 거의 정확하게 재현하고 있으나, peak 전후에서는 약간의 오차를 보이고 있다. 관측된 결과에 의하면 2003년 9월 12일 03~09시에는 최대 수위하강이 -81 cm, 9월 13일 00~02시에는 최대 수위하강이 -78 cm 일어났다. 태풍 통과 후에 발생한 수위하강은 기압상승과 외해 방향으로의 바람응력

에 의해 일어날 수 있으나, 태풍이 마산연안에 도착하기 15~16시간 전에 수위가 -81 cm 정도 하강한다는 것은 이론상 이해하기 어려운 부분이다. 태풍이 마산연안에 도달하기 대략 3~8시간 전에는 풍향의 변화에 따라 연안수가 외해로 유출되기 때문에 수위의 하강이 일어날 수 있다. 그러나 이것은 태풍이 마산연안에 도착하기 15~16시간 전이고, 수위의 하강량도 -81 cm로 대단히 크기 때문에 관측의 오차인 것으로 판단된다. 2003년 9월 12일 18~20



(a) Computed Inundation Area (Red Line) at 22:00 on Sep. 12, 2003



(b) Surveyed Inundation Area (Yellow Line)

Fig. 12. Comparison of Computed and Surveyed Inundation Area in Masan City

시 사이 수치모형 결과와 관측결과와의 사이에 발생한 오차는 수치모형과 실제 태풍과의 사이에 태풍의 이동속도 차 및 기압분포차 등에 의한 것으로 추정되나, 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 11은 마산항 (Fig. 2의 정점 T1)에서 3차원 모형과 2차원 모형에 의한 storm surge의 계산결과를 비교하여 나타냈다. 3차원 모형에 의한 storm surge의 최고 수위는 238 cm이고, 2차원 모형에 의한 최고수위는 208 cm로 나타났다. 즉, 3차원 모형에 의해서 계산한 storm surge는 현장관측결과와 8 cm 정도 크게 나타났으나, 2차원 모형에 의해 계산한 결과는 현장관측결과보다 약 22 cm 정도 작게 나타났다. 태풍해일을 해석할 때 3차원 모형이 2차원 모형보다 정확하게 재현하기 때문에 3차원 모형을 사용하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 연안침수해석은 태풍해일 모형을 기초로 하기 때문에 3차원 모형을 사용하는 것이 2차원 모형을 사용하는 것보다 침수해역을 보다 정확하게 해석할 수 있다. 아직까지 연안지역의 표고 등에 대한 정확한 수치 지도가 완성되지 않았기 때문에 정확한 침수지역의 범위와 침수높이를 해석하기에는 다소 무리가 있다.

4.4.3 마산연안 침수 수치계산 결과 비교

Fig. 12는 태풍 “매미” 통과시인 2003년 3월 12일 22시

3차원 침수모형으로 계산한 침수지역과 현장 조사결과에 의한 침수지역과의 비교를 나타낸다. Fig. 12(a)는 침수모형으로 계산한 침수지역 (적색선)을 나타내고, Fig. 12(b)는 태풍 “매미” 통과 시 현장 조사 결과에 의한 마산 연안의 침수지역 (황색선)을 나타내고 있다.

Fig. 12(a)에서는 적색선이 침수지역을 나타내고, 그림에서 숫자는 수치 계산한 storm surge의 수위이다. Fig. 12(b)에서는 황색선이 침수지역을 나타내고, 그림에서 숫자는 수심을 나타낸다. 수치계산결과에 의하면, 2003년 3월 12일 22시 태풍 “매미”시 마산만의 storm surge는 2.0 ~ 2.4 m 크기이다. 침수모형으로 계산한 침수지역은 현장 조사결과에 의한 침수지역과 거의 일치하고 있다.

본 연구결과를 종합해 보면, 3차원 침수모형은 storm surge와 침수지역을 비교적 잘 재현하였으며, 또한 3차원 모형이 2차원 모형보다 storm surge를 보다 정확하게 해석하였다.

5. 결 론

마산해안도시 침수지역을 추산하기 위해 1) 1/1,000 및 1/5,000 수치육도와 전자해도를 이용하여 수치격자체계를 구성하였고, 2) 태풍 시 해상풍 모형을 구축하여 바람장

및 기압장을 해석하였으며, 3) 3차원 침수모형을 구축하여 2003년 태풍 “매미” 통과 시 마산연안 storm surge, 태풍류를 수치계산한 후 침수지역을 수치 해석하였다. 마산연안에서 수치 계산한 침수지역은 현장 조사결과와 거의 일치하였으며, 마산항에서 3차원 모형에 의한 storm surge의 최고 수위는 238 cm로 현장관측치 (230 cm)를 비교적 정확하게 평가하였다. 그러나 storm surge가 peak에 도달하기 2~3시간 전에 수치모형 결과와 관측결과와의 사이에 다소의 오차가 발생하고 있다. 이는 수치모형과 실제 태풍과의 사이에 태풍의 이동속도차 및 기압분포차 등에 의한 것으로 추정되나, 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다. 또한, 3차원 모형과 2차원 모형 결과를 비교하였는데 3차원 모형이 2차원 모형보다 storm surge를 보다 정확하게 해석하였다. 마산만에서 태풍해일에 의해 발생한 태풍류는 표층에서는 30~60 cm/s 크기로 만내로 유입하나, 저층에서는 20~40 cm/s 크기로 만외로 유출하는 흐름이 탁월하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설기술혁신사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고문헌

강시환, 전기천, 김상익, 한성대 (2004). “태풍 매미 통과 시 남해안 해일 모의 산정.” **2004 대한토목학회 정기 학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 989-993.

강주환, 박선중, 박민원 (2008). “서남해안의 해수면 상승과 해일고 증가 영향.” **한국해안·해양공학회 논문집**, 한국해안·해양공학회, 제20권, 제1호, pp. 14-24.

김차겸, 이종태 (2005). “3차원 모델에 의한 남동해안 태풍해일 산정.” **2005 대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 780-783.

문승록, 박선중, 강주환, 윤종태 (2006). “MIKE 21 모형을 이용한 목포해역 해일/범람모의.” **한국해안·해양공학 회지**, 한국해안·해양공학회, 제18권, 제4호, pp. 348-359.

이종섭, 주귀홍, 장선덕 (1990). “부산연안 폭풍해일의 변동양상과 수치예측.” **한국해안·해양공학회지**, 한국해안·해양공학회, 제2권, 제2호, pp. 104-111.

한국수자원학회 (2003). 2003년 태풍 매미로 인한 재해특성 및 조사보고서. 한국수자원학회, pp. 197-215.

Bretschneider, C.L., and Lo, J.M. (1984). “A Rankin vortex number as a guide to the selection of a model hurricane.” *In Proc. 19th ICCE*, pp. 147-161.

Choi, B.H., Eum, H.M., Kim, H.S., Jeong, W.M., and Shim, J.S. (2004). “Wave-tide-surge coupled simulation for typhoon Maemi.” *Waves and Storm Surges around Korean Peninsula, Workshop Proceeding*, J. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, pp. 121-144.

Holland, G.J. (1980). “An analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes.” *Monthly Weather Review*, AMS, Vol. 108, No. 8, pp. 1212-1218.

Kawai, H., Kim, D.-S., Kang, Y.-K., Tomida, T., and Hiraishi, T. (2005). “Hindcasting of storm surges in Korea by Typhoon 0314 (Maemi).” *Proceeding of ISOPE 2005*, pp. 446-453.

Kim, C.-K., and Lee, J.T. (2007). “Storm surge hindcast using a three-dimensional numerical model.” *21th annual conference of PACON 2007*, pp. A-29.

Kunugi, T. (1997). “Direct numerical algorithm for multiphase flow with free surface and interface.” *J. Society of Japanese Mechanical Eng.*, Vol. 639, No. 609, pp. 88-96.

Lee, J.-C., Jun, K.-C., Park, K.-S., and Kwon, J.-I. (2007). “Hindcast of the storm surge, Typhoon Maemi.” *21th annual conference of PACON 2007*, pp. A-30.

Oh, I.S., and Kim, S.I. (1990). “Numerical simulations of the storm surges in the sea around Korea.” *J. Oceanographical Society of Korea*, Vol. 25, No. 4, pp. 161-181.

Wang, X, Yan, T., and Hu, Q. (2005). “An application of numerical simulation and correlation method to calculate storm surge elevations with certain return years.” *Proceeding of ISOPE 2005*, pp. 454-458.

Watanabe, A., and Shibaki, H. (2002). “Study of multi-level simulation model for storm surge considering density stratification and wave setup.” *J. Hydraulics, Coastal and Envir. Eng.*, JSCE, No. 719/II-61, pp. 47-66.

Yasuda, T., Hiraishi, T., Kawai, H., Nagase, K., Kang S.-W., and Heong, W.M. (2005). “Field survey and computational analysis of storm surge disaster in Masan due to Typhoon Maemi.” *Asian and Pacific Coasts 2005*.

Yeh, S.-P., Lee, B.C., Doong, D.-J., Kuo, C.-L., and

Kao, C.C. (2005). "The coastal hazards warning system based on the operational wave and storm surge models." *Proceeding of ISOPE 2005*, pp. 440-445.

논문번호: 08-113	접수: 2008.12.01
수정일자: 2009.07.28/2010.11.04	심사완료: 2010.11.04